

周定文, 范广洲, 华维, 等. 2009. 我国春季降水与青藏高原东南部冬季归一化植被指数变化的关系 [J]. 大气科学, 33 (3): 649–656.
Zhou Dingwen, Fan Guangzhou, Hua Wei, et al. 2009. Relationship between spring rainfall in China and winter normalized difference vegetation index in the southeast of Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 649–656.

我国春季降水与青藏高原东南部冬季 归一化植被指数变化的关系

周定文^{1,2,3} 范广洲^{2*} 华维² 李学敏² 刘雅勤² 王永立²

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 成都信息工程学院高原大气与环境研究中心, 成都 610225

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 利用 1982 年 1 月~2001 年 12 月归一化植被指数 (NDVI) 资料、台站实测降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 通过相关分析和合成分析等方法, 初步分析了我国春季降水与青藏高原冬季植被变化的关系。结果发现, 我国春季降水与青藏高原冬季 NDVI 有较明显的相关关系。一般而言, 高原冬季 NDVI 大值年时, 贵州至两广地区降水减少, 两湖平原和鄱阳湖平原降水增加, 长江流域以北至东北的广大地区降水将减少, 特别是黄河与长江之间地区降水量偏少可达 40 mm 以上。高原冬季 NDVI 与我国东部季风区春季降水的相关系数呈“一十一”的分布状态。100°E~130°E 各月降水及其差值时空剖面分析也可看到其差异。文章也初步分析了高原冬季 NDVI 大值年和小值年春季海平面气压场、850 hPa 风场、500 hPa 高度场以及 700 hPa 垂直运动场的差异, 从分析结果可以看到, 亚洲和西太平洋地区大气环流的差异也同样明显。可见, 青藏高原冬季 NDVI 的大小将通过改变亚洲和西太平洋地区春季大气环流的分布状态, 导致冬季风和夏季风爆发和进退差异, 从而引起我国春季降水的变化。

关键词 青藏高原 植被变化 归一化植被指数 春季降水 大气环流

文章编号 1006-9895 (2009) 03-0649-08

中图分类号 P461

文献标识码 A

Relationship between Spring Rainfall in China and Winter Normalized Difference Vegetation Index in the Southeast of Tibetan Plateau

ZHOU Dingwen^{1,2,3}, FAN Guangzhou², HUA Wei², LI Xuemin²,
LIU Yaqin², and WANG Yongli²

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Center for Plateau Atmospheric and Environmental Research, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract On the basis of the monthly precipitation data during 1982–2001 collected from 624 observational stations in China, normalized difference vegetation index (GIMMS NDVI) and the NCEP/NCAR reanalysis data, the au-

收稿日期 2007-11-07, 2008-01-11 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675037, 四川省青年科技基金资助重点项目 05ZQ026-023, 国家科技基础条件平台项目 2003DIB3J120

作者简介 周定文, 男, 1963 年生, 博士研究生, 研究方向: 气候变化与陆地相互作用。E-mail: zdw@cuit.edu.cn

* 通讯作者: E-mail: fanggz@cuit.edu.cn

thors analyzed the relationship between the preceding winter vegetation variation over the Tibetan Plateau (TP) and spring precipitation in China. As a result, there are obvious connections between the spring precipitation fluctuation in China and the preceding winter vegetation variation over the TP. When the preceding winter NDVI is high, the precipitation in Guizhou, Guangdong, Guangxi provinces and from the north areas of the Yangtze River valley to Northeast China tends to be less, especially the precipitation over the areas from the Yellow River to the Yangtze River reduced more than 40 mm. The precipitation in the Jiangnan and Dongting Lake plains and the Poyang Lake plain tends to be more. The correlation coefficient between the preceding winter NDVI over the TP and spring precipitation over the east monsoon areas of China presents the “-+-” distribution. The analysis of the time-space cross sections of precipitation averaged over $100^{\circ}\text{E} - 130^{\circ}\text{E}$ for high and low preceding winter NDVI years and their difference shows the similar features. The authors also analyzed the differences of spring sea level pressure field, 850-hPa wind field, 500-hPa geopotential height field and 700-hPa vertical velocity field between high and low preceding winter NDVI years. The results show that the winter NDVI over the TP can change the Asian and western Pacific atmospheric circulation distributions, then affects the onset and advance/retreat of winter and summer monsoon, and finally lead to the spring precipitation change in China.

Key words Tibetan Plateau, vegetation variability, normalized difference vegetation index, spring rainfall, atmospheric circulation

1 引言

我国是农业大国,农业生产受气候变化的影响非常明显。春季正值农作物播种以及冬小麦返青和生长的季节,因此,春季降水严重影响农作物的播种以及冬小麦的生长,并且,我国北方春季降水影响着该地区生态环境,特别是严重影响着沙尘暴的形成与发生。然而,对于气候变化的研究主要集中在冬、夏季气候的变化,而对春季气候变化的研究还较少(张恒德等,2006;周连童等,2006)。我国地处东亚季风区,春季是东亚冬季风向夏季风过渡的季节,气候变化明显,尤其降水的变化非常显著,与降水相关的气象灾害,特别是春旱是我国春季最重要的自然灾害之一。因此,研究我国春季降水的变化及其影响因素有着重要的科学价值。

很多科学家研究表明,青藏高原热源(赵平等,2001;Zhao et al., 2001;张顺利等,2001;包庆等,2008)、青藏高原对流活动(张庆云等,2006)、亚洲季风(陈隆勋等,2004)、海洋影响(杨修群等,2003)、海冰作用(Zhao et al., 2004)、副高影响(赵平等,2005)、南亚高压(张琼等,2001)等因素对我国降水有着明显的影响。在这些研究中,青藏高原地表特征及与之相关的高原热源效应无疑是最重要的影响因素之一(刘晓冉等,2008)。青藏高原下垫面的物理属性和物理状态决定高原对大气的非绝热加热影响,因此,青藏高原下垫面的

物理状态一直是气象学家和地理学家所关心的研究领域。青藏高原是全球变化的敏感地区,全球变暖在高原地区尤为突出,这对高原陆地生态系统演变的影响将是非常明显的,这必将导致高原生态系统的变化,这种变化又必然通过陆气相互作用对陆气间水热平衡和碳循环等产生影响,而且这种影响直接作用于中层大气,引起局地、区域气候的响应,导致局地、区域、甚至全球的气候变化。因此,研究青藏高原地区植被变化过程及其与气候变化的关系显得非常重要。

关于青藏高原植被变化对气候变化的影响问题,已经有不少研究工作。有研究指出,如果不考虑高原上的植被,大气湿度和地面潜热输送均减小,削弱了扰动发展和高原上东西方向波的传播,可能会影响高原低涡和西南涡的东移,进而影响夏季江淮地区的降水(周锁铨等,1995,1998)。王兰宁等(2002)利用 CCM3 和 RegCM2 嵌套研究认为,高原植被大面积破坏后,西风急流偏西偏北,使北方冷空气难以到达我国长江流域,而孟加拉湾地区经向风减弱,导致向我国内陆输送的水汽减少,其综合作用使我国大部分地区的降水明显减少。范广洲等(2002)指出,高原变为荒漠时,地表气温将略有增加,植被蒸腾耗热量变为 0,地表蒸发耗热增加明显,可能会导致土壤湿度下降,荒漠化加剧,地表热源将增加,说明荒漠化将影响高原夏季热源,对高原及其周边气候产生影响。

近些年来,随着卫星对地观测资料的积累,利用卫星遥感的植被资料分析植被与气候变化相互作用的研究工作逐渐增多。Kogan (2000) 分析了 ENSO 对区域和全球植被状况的影响。Chase et al. (1996) 利用最大叶面积指数 (LAI) 研究了现实植被和自然植被条件下冬季和夏季气候的变化。Yang et al. (1997) 研究了美国内布拉斯加州归一化植被指数 (NDVI) 和气温之间关系。朴世龙等 (2003) 利用 NOAA/AVHRR 的 NDVI 分析了我国植被活动的年际变化趋势,认为青藏高原植被对全球变化的响应最为明显。李晓兵等 (2000) 分析了 NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性。杨元合等 (2006) 发现青藏高原近 18 年来 NDVI 显著增加,并存在明显的季节和年际变化,春季为 NDVI 增加率和增加量最大的季节。张井勇等 (2003) 认为我国多数地区前期 NDVI 与后期降水呈正相关关系,同时这种相关也存在地区差异,华中和青藏高原地区上年冬季 NDVI 与降水的相关性最好。而春季则以东部的干旱-半干旱区和青藏高原地区的相关性最好。并且指出这些地区植被变化对气候更敏感。董文杰等 (2005) 指出,植被变化不仅对当地降水产生影响,也影响到其他地区的降水,尤其是沿季风的下游地区。Zhou et al. (2007) 利用 NDVI 资料和台站实测的年平均最高气温、年平均最低气温、年平均气温和年总降水量资料,分析研究了青藏高原地区 NDVI 的变化特征及其与气候变化的关系。

上述工作表明,青藏高原地区植被变化是影响高原下垫面特征的重要因素,其变化将引起高原热源的变化,从而可能导致区域气候的相应改变。本文将利用青藏高原地区 1982~2001 年 NDVI 资料和同期的全国大陆地区 624 个台站实测降水资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料,分析了我国春季降水与青藏高原冬季植被变化的关系。

2 资料简介

归一化植被指数 (NDVI) 能够较准确地反映植被的覆盖程度、生长状况、生物量以及光合作用强度 (Tucker et al., 1986), 因而被广泛用于陆地生态系统与全球气候变化的研究中 (Richard et al., 1998)。本文应用的 NDVI 资料是由全球监测与模型研究所 (GIMMS) 提供, 时间为 1982 年 1 月~

2001 年 12 月, 空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。它是已积累的 NOAA 的 AVHRR-NDVI 系列和 1998 年后使用的 NASA 的 MODIS-NDVI 系列的联合数据集。月平均 NDVI 数据采用国际通用的 15 天最大合成法获得, 1982 年的 El Chichon 火山和 1991 年菲律宾的 Mt. Pinatubo 火山爆发引起的平流层气溶胶变化, GIMMS 利用交叉辐射定标法降低了其对 NDVI 的影响。该资料还考虑了全球范围内其他因素对 NDVI 值的影响进行了校正: ① 卫星传感器的不稳定性校正; ② 热带阔叶林区云的覆盖引起的变形校正; ③ 太阳天顶角和观测角度的校正; ④ 对北半球冬季缺失的数据采用了插值法; ⑤ 短期大气气溶胶、水蒸汽及云层覆盖的影响校正。

降水资料采用我国大陆地区 624 个台站实测的 1982 年 1 月~2001 年 12 月月降水量资料。

大气环流资料采用 NCEP/NCAR 的 1982 年 1 月~2001 年 12 月月平均再分析资料, 其空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。本文利用这些 NDVI 资料、降水资料和大气环流资料分析我国春季降水与青藏高原冬季植被变化的关系。

3 结果分析

3.1 我国春季降水与高原冬季 NDVI 变化的关系

3.1.1 相关分析

为了解我国春季降水与前期青藏高原冬季 NDVI 变化的关系, 首先计算了 1982~2001 青藏高原 (海拔 3000 m 以上地区) 平均冬季 (12 月、1 月、2 月平均) NDVI 与我国随后春季 (3~5 月平均) 降水量的相关系数 (图 1)。

从图 1 中可见, 贵州到广西、广东等地为负相关区, 特别是贵州南部和广东东部等地, 相关系数可以通过 90% 信度检验。长江中下游以南地区, 主要是两湖平原和鄱阳湖平原为正相关区, 但未能通过信度检验。长江中下游以北至东北平原地区为负相关区, 其中四川盆地以北到河套地区, 华北平原和东北平原地区, 相关系数通过 90% 信度检验, 特别是四川盆地、华北南部以及东北平原, 相关系数绝对值达 0.6 以上, 通过 99% 的信度检验。青藏高原及其北侧为正相关系数分布, 高原中部和东南部通过 90% 的信度检验。从上述分析可见, 我国春季的降水多少与前期高原冬季 NDVI 大小有较为密切的关系, 东部季风区相关系数分布基本呈“一十—”

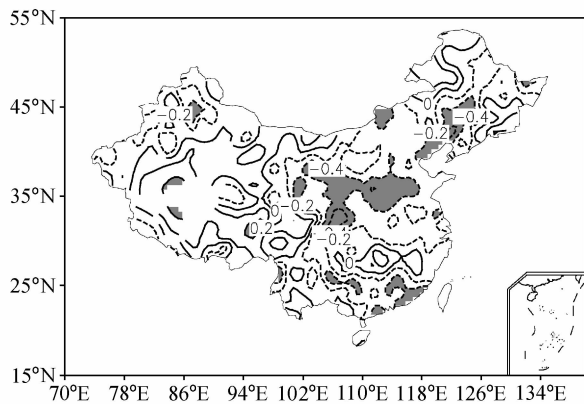


图1 青藏高原冬季 NDVI 与我国春季降水滞后相关图。阴影代表通过 90% 信度检验

Fig. 1 The correlation coefficient distribution between the preceding winter NDVI (normalized difference vegetation index) over the Tibetan Plateau and the spring precipitation over China. The areas exceeding 90% confidence level are shaded

分布。

3.1.2 合成分析

为进一步探讨我国春季降水与青藏高原冬季 NDVI 变化的关系,利用合成分析方法,分析了青藏高原冬季 NDVI 大值年和小值年我国春季降水差异的时空分布。关于高原冬季 NDVI 大值年和小值年的选取,先对青藏高原地区 20 年冬季 NDVI 求得每个格点的格点距平和均方差,如果该年有 1/4 以上格点的距平大于其均方差,则该年确定为 NDVI 较大的年份,若有 1/4 以上格点的距平小于均方差,则该年为 NDVI 较小的年份。根据这种方法,选取 1988、1994、1999 和 2001 年为 NDVI 大值年,这些年的平均值作为高原冬季大值年 NDVI 值;选取 1983、1985、1998 年为 NDVI 小值年,这些年的平均值作为高原冬季小值年 NDVI 值。另外,根据青藏高原冬季 NDVI 距平图(图 2),可以看到峰值和谷值与上述方法选取的大值年和小值年的结果基本一致,这说明论文选取的大值年和小值年具有较好的代表性。

图 2 为 1982~2001 年青藏高原 3000 m 以上地区冬季(12 月、1 月、2 月平均) NDVI 距平图,由图可见,20 年来高原冬季 NDVI 总体呈增加趋势。特别是从 1983 年到 1991 年、1998 年到 2001 年这两个阶段,NDVI 增加较为明显,而从 1994 年到 1998 年期间,高原冬季 NDVI 有所减少。

由高原冬季 NDVI 大值年与小值年春季降水

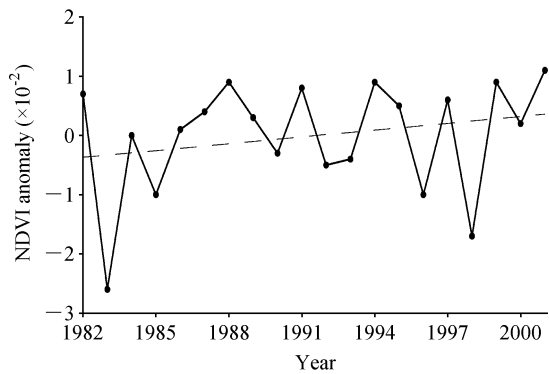


图2 1982~2001 青藏高原冬季 NDVI 距平图。直线为线性拟合线

Fig. 2 The winter NDVI anomaly over the Tibetan Plateau during 1982~2001. The beeline is the linear fitting

差值图(图 3)可见,贵州至两广地区为负差值区,尤其两广沿海地区差值较大。长江中下游以南的两湖平原和鄱阳湖平原为正差值。长江流域以北直到东北的广大地区为负差值区,其中长江中下游以北、河套及其以南、华北等地区差异明显,通过 90% 的信度检验,特别是黄河与长江之间的地区差异最大,降水量差值达到 40 mm 以上。对比图 1 和图 3 可知,两图的正、负区域对应比较一致,通过信度检验的区域也比较一致。可见,我国春季降水与前期青藏高原冬季 NDVI 的大小之间存在较显著的相关关系。

图 4 是青藏高原冬季 NDVI 大值年(图 4a)、小值年(图 4b)和大值年减小值年(图 4c) 100°E~130°E 各月降水及其差值时空剖面图,由图可见,在青藏高原冬季 NDVI 大值年,1~5 月各月降水最大的区域位于 25°N~30°N 之间,6 月出现月降水量达到 240 mm 的降水大值带,中心主要位于 23°N 以南和 28°N~30°N 之间地区(图 4a)。小值年时,1~5 月各月降水最大区域位于约 22°N~26°N 之间,与大值年位置明显偏南,但降水量明显偏大,这在图 4c 中更为清楚。6 月降水最大中心基本连成一片,主要位于约 21°N~30°N,与大值年明显的两个中心不同。从图 4c 可知,1~3 月我国从华南沿海到东北,降水差值以负值为主,其中 22°N~26°N 之间冬季降水差值最大,最大差异可达 -60 mm/月。4 月全区降水差值也基本为负值,仅在 28°N 附近地区为正值,但该月降水差值绝对值不大。29°N 以南地区 5~6 月正降水差值最大,最

大中心可达 80 mm/月。其他区域降水差值以负值为主。这些特征表明，青藏高原冬季 NDVI 大值年和小值年相比，我国雨带的分布形式和降水量都存在较为显著的差异，可见，我国降水与青藏高原冬季 NDVI 的大小有较明显的关系。

3.2 冬季 NDVI 变化对大气环流的影响

通过前文分析可知，高原冬季 NDVI 的多、少

与我国春季降水有较明显的统计关系。为探讨 NDVI 与降水之间的这种关系是否存在内在联系，下面利用合成分析，对比分析海平面气压场、850 hPa 风场、500 hPa 高度场以及 100 hPa 高度场来研究高原冬季 NDVI 大值年和小值年大气环流的差异，从而探讨降水变化与 NDVI 的关系。高原冬季 NDVI 大值年和小值年的选取见前文。

3.2.1 海平面气压场

从 1971~2000 年春季气候平均海平面气压场分布图（图略）上可知，亚洲大陆至西太平洋地区表现为明显的鞍形场分布特征，两个高值中心分别位于西伯利亚至蒙古国西部地区 and 西太平洋地区。两个低值中心分别位于印度半岛和我国东北地区。海平面气压场的这种分布形式说明印度夏季风已经爆发，我国夏季风还主要位于南方地区。对比青藏高原冬季 NDVI 大值年和小值年春季海平面气压场可以看到（图略），两者有着明显的差异。图 5 给出的是青藏高原冬季 NDVI 大值年减小值年春季海平面气压场差值图，由图可见，从北印度洋到南海以及西太平洋地区，海平面气压场差值均为负值，而大陆地区的海平面气压场差值均为正值，特别是从蒙古国至我国华北地区，可通过 90% 的信度

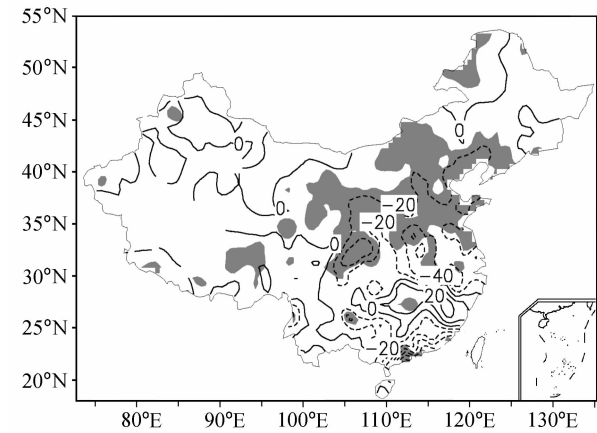


图 3 高原冬季 NDVI 大值年与最小值年春季降水差值图。阴影代表通过 90% 信度检验

Fig. 3 The spring precipitation difference (mm) over China between high and low preceding winter NDVI years. The areas exceeding 90% confidence level are shaded

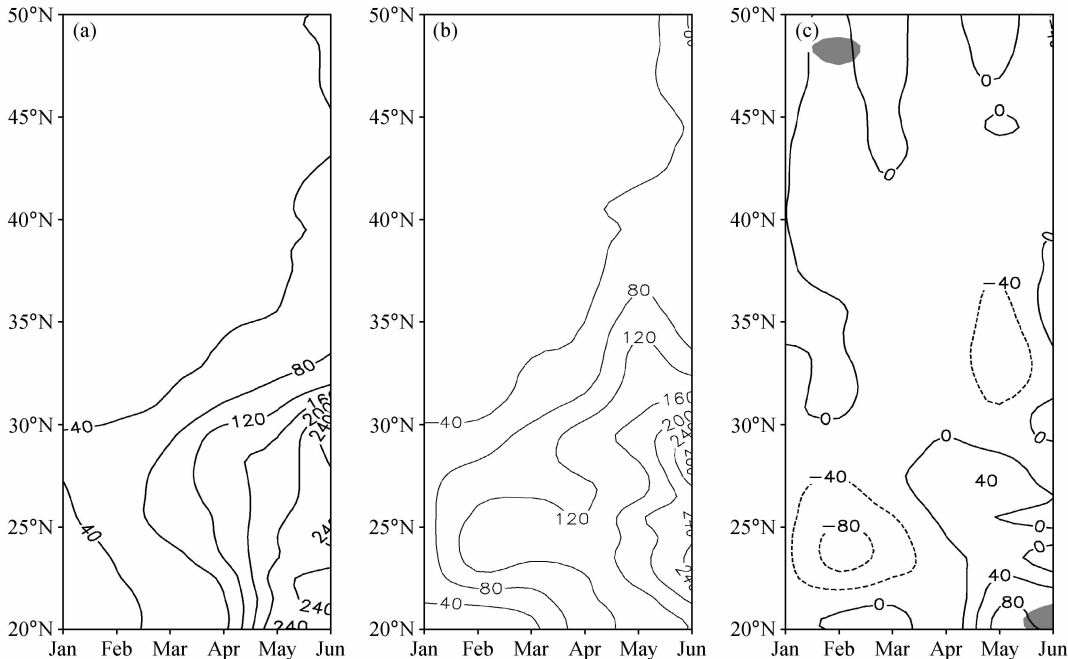


图 4 青藏高原冬季 NDVI (a) 大值年、(b) 小值年和 (c) 大值年减小值年 100°E~130°E 平均降水的时空剖面图。阴影代表通过 90% 信度检验

Fig. 4 Time-latitude cross sections of precipitation (mm) averaged over 100°E~130°E; (a) High winter NDVI years; (b) low winter NDVI years; (c) the difference between high and low winter NDVI years. The areas exceeding 90% confidence level are shaded

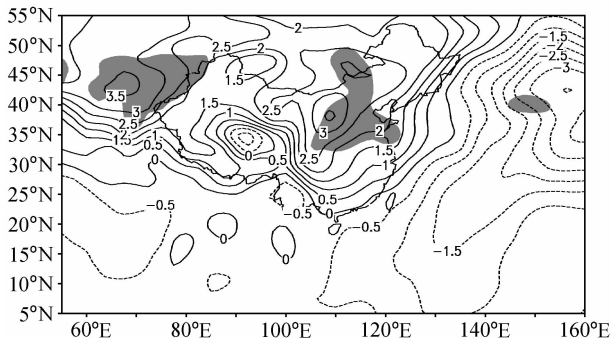


图5 青藏高原冬季 NDVI 大值年减小值年春季海平面气压场差值图 (单位: hPa)。阴影代表通过 90% 信度检验

Fig. 5 The spring sea level pressure difference (hPa) between high and low preceding winter NDVI years. The areas exceeding 90% confidence level are shaded

检验。海平面气压场的这些差异表明, 青藏高原冬季 NDVI 大值年时, 东亚春季夏季风爆发和冬季风北撤被减弱, 因此雨带将主要被限制在华南地区, 这与前文降水的分析结果是一致的。

3.2.2 500 hPa 高度场

500 hPa 高度场最明显的两个系统为东亚大槽和西太平洋副热带高压, 这两个系统都是影响我国夏季风强弱、降水分布状态与多少的重要天气系统。从青藏高原冬季 NDVI 大值年减小值年春季 500 hPa 高度场差值图 (图 6) 上可以看到, 大陆地区 500 hPa 高度场以正差值为主; 海洋上除 140°E 以东、25°N~10°N 地区 500 hPa 高度场差值为正值以外, 其他地区均为负值, 特别是日本以东洋面, 500 hPa 高度场差值最明显, 最大中心值可达 100 gpm, 通过 90% 信度检验。500 hPa 高度场差值的上述分布形式说明, 青藏高原冬季 NDVI 大值年东亚大槽位置将偏西, 强度明显偏弱。西太平洋副热带高压位置偏东、偏南。东亚大槽和西太平洋副热带高压的这些变化将导致我国春季雨带位置偏南, 我国东部季风区大部分地区降水将减少。

3.2.3 850 hPa 风场

从 1971~2000 年春季气候平均 850 hPa 风场分布图 (图略) 上可知, 我国西南地区和华南地区为明显的偏南风, 东北地区为西北风, 西太平洋洋面上为明显的反气旋式环流。在青藏高原冬季 NDVI 大值年减小值年春季 850 hPa 风场差值图 (图 7) 上可见, 我国东部季风区基本为明显的偏东北气流, 说明青藏高原冬季 NDVI 大值年春季东亚

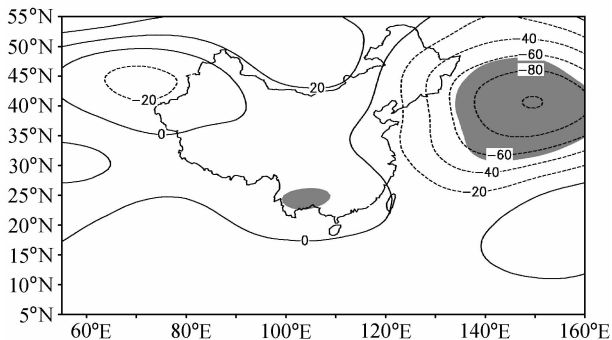


图6 青藏高原冬季 NDVI 大值年减小值年春季 500 hPa 高度场差值图 (单位: gpm)。阴影代表通过 90% 信度检验

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the spring 500-hPa geopotential height difference (gpm)

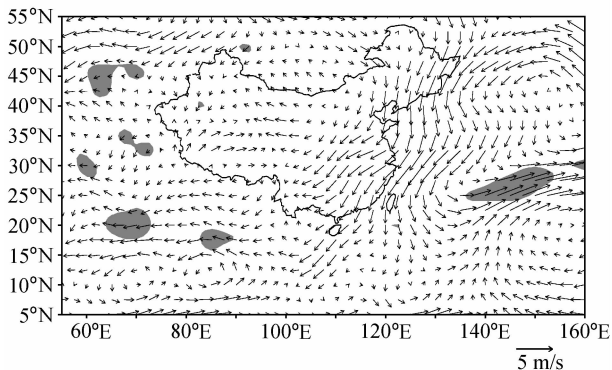


图7 青藏高原冬季 NDVI 大值年减小值年春季 850 hPa 风场差值图 (单位: m/s)。阴影代表通过 90% 信度检验

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the spring 850-hPa wind field difference

地区夏季风减弱明显; 25°N 以北洋面上, 差值气流主要为气旋式风场, 25°N 以南洋面上反气旋式气流加强。说明青藏高原冬季 NDVI 大值年与小值年相比, 春季副热带高压位置将偏南。

3.2.4 垂直运动场

垂直运动场可以直接影响降水。一般情况下, 春季 700 hPa 等压面上, 我国 35°N 以南地区都为上升运动, 以北以下沉运动为主。从青藏高原冬季 NDVI 大值年减小值年春季 700 hPa ω 场差值图 (图 8) 上可以看到, 我国西南地区上升运动加强较为明显, 黄河中下游地区上升运动略有增强, 其他地区表现为上升运动减弱或下沉运动增强, 其中长江中下游地区上升运动减弱最明显。垂直运动的这种变化特征与前文所述降水场的变化也基本吻合。

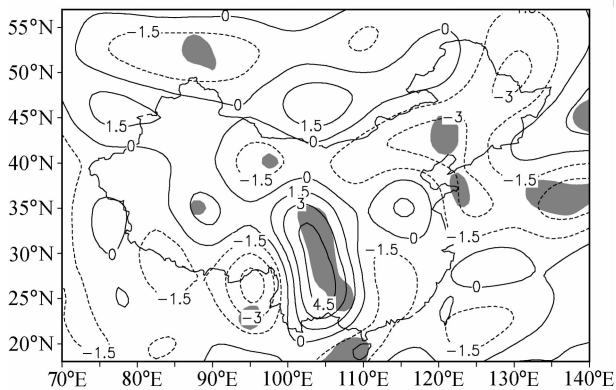


图 8 青藏高原冬季 NDVI 大值年与小值年春季 700 hPa ω 场差值图 (单位: -10^{-4} hPa/s)。阴影代表通过 90% 信度检验
Fig. 8 Same as Fig. 5, but for the spring 700-hPa ω field difference (-10^{-4} hPa/s)

4 结论及讨论

本文利用 1982 年 1 月~2001 年 12 月 NDVI 资料、台站实测的降水资料 NCEP/NCAR 再分析资料, 通过相关分析和合成分析等方法, 初步分析了我国春季降水与青藏高原冬季植被演变之间的关系。

通过研究发现, 高原冬季植被多少与我国春季降水存在明显的相关关系。一般而言, 高原冬季 NDVI 大值年时, 贵州至两广地区降水减少, 两湖平原和鄱阳湖平原降水增加, 长江流域以北直到东北的广大地区降水也将减少, 特别是黄河与长江之间的地区降水量偏少可达 40 mm 以上。高原冬季 NDVI 与我国东部季风区春季降水的相关系数呈“一十一”的分布状态。100°E~130°E 各月降水及其差值时空剖面分析也可看到其差异。

对高原冬季 NDVI 大值年和小值年春季海平面气压场、850 hPa 风场、500 hPa 高度场以及 700 hPa 垂直运动场的对比分析可见, 亚洲和西太平洋地区的大气环流也同样差异显著。

大气环流的这些变化特征, 与降水的变化特征表现出很好的一致性, 这说明我国春季降水与青藏高原冬季 NDVI 之间的联系是明显的, 而这种联系的内在机制是一个值得深入研究的科学问题。

参考文献 (References)

包庆, Wang Bin, 刘屹岷, 等. 2008. 青藏高原增暖对东亚夏季风的影响——大气环流模式数值模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (5):

- 997-1005. Bao Qing, Wang Bin, Liu Yimin, et al. 2008. The impact of the Tibetan Plateau warming on the East Asian summer monsoon — A study of numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2008, 32 (5): 997-1005.
- Chase T N, Pielke R A, Kittel T G F, et al. 1996. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index [J]. Journal of Geophysical Research, 101 (D3): 7393-7408.
- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. 气象学报, 62 (5): 634-645. Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 62 (5): 634-645.
- 董文杰, 封国林, 韦志刚, 等. 2005. 陆-气相互作用对我国气候变化的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 185-188. Dong Wenjie, Feng Guolin, Wei Zhigang, et al. 2005. Influences of Land-Atmosphere Interaction on Climate Change over China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 185-188.
- 范广洲, 程国栋. 2002. 影响青藏高原植被生理过程与大气 CO₂ 浓度及气候变化的相互作用 [J]. 大气科学, 27 (4): 509-518. Fan Guangzhou, Cheng Guodong. 2002. Interactions between physiological process of the Tibetan Plateau vegetation and CO₂ concentration and climate change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 509-518.
- Kogan F N. 2000. Satellite-observed sensitivity of world land ecosystems to EL Niño/La Niña [J]. Remote Sensing of Environment, 74 (3): 445-462.
- 李晓兵, 王瑛, 李克让. 2000. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性 [J]. 地理学报, 55 (增刊): 82-89. Li Xiaobing, Wang Ying, Li Kerang. NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in northern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 55 (Suppl.): 82-89.
- 刘晓冉, 李国平, 程炳岩. 2008. 青藏高原前期冬春季地面热源与我国夏季降水关系的初步分析 [J]. 大气科学, 32 (3): 561-571. Liu Xiaoran, Li Guoping, Cheng Bingyan. The preliminary analysis of the relationships between the surface heat source over the Tibetan Plateau in winter and spring and the summer rainfall over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2008, 32 (3): 561-571.
- 朴世龙, 方精云. 2003. 1982-1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异 [J]. 地理学报, 58 (1): 119-125. Piao Shilong, Fang Jingyun. 2003. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (1): 119-125.
- Richard Y, Poccarr I. 1998. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in southern Africa [J]. International Journal of Remote sensing, 19 (15): 2907-2920.
- Tucker C J, Fung I Y, Keeling C D, et al. 1986. Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegeta-

- tion index [J]. *Nature*, 319: 195–199.
- 王兰宁, 郑庆林, 宋青丽. 2002. 青藏高原下垫面对中国夏季环流影响的研究 [J]. *南京气象学院学报*, 25 (2): 186–191. Wang Lanning, Zheng Qinglin, Song Qingli. 2002. Influences of surface conditions over the Tibetan Plateau on China summer circulation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 25 (2): 186–191.
- 杨修群, 谢倩, 郭燕娟, 等. 2003. 华北降水年代际变化特征及其与全球海气系统变化的联系 [M]//黄荣辉, 李崇银, 王绍武, 等. 我国旱涝重大气候灾害及其形成机理研究. 北京: 气象出版社, 365–375. Yang Xiuqun, Xie Qian, Guo Yanjuan, et al. Interdecadal variation characteristics of rainfall over North China and its relationship to change of global air–sea system [M]//Huang Ronghui, Li Chongyin, Wang Shaowu, et al. Flood/Drought Severe Climate Disaster in China and Study on Its Formation Mechanism (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 365–375.
- Yang W, Yang L, Merchant J W. 1997. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U. S. A. [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 2161–2180.
- 杨元合, 朴世龙. 2006. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系 [J]. *植物生态学报*, 30 (1): 1–8. Yang Yuanhe, Piao Shilong. 2006. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Plant Ecology (in Chinese)*, 30 (1): 1–8.
- 张恒德, 高守亭, 张友姝. 2006. 北极涛年代际变化及其与我国春季降水的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (5): 593–604. Zhang Hengde, Gao Shouting, Zhang Youshu. 2006. The interdecadal variation of North Polar vortex and its relationships with spring precipitation in China [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (5): 593–604.
- 张井勇, 董文杰, 叶笃正, 等. 2003. 中国植被覆盖对春季气候影响的新证据 [J]. *科学通报*, 48 (1): 91–95. Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Ye Duzheng, et al. 2003. New evidences for influence of vegetation cover over China on spring climate [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 48 (1): 91–95.
- 张庆云, 金祖辉, 彭京备. 2006. 青藏高原对流时空变化与东亚环流的关系 [J]. *大气科学*, 30 (5): 802–812. Zhang Qingyun, Jin Zuhui, Peng Jingbei. 2006. The relationships between convection over the Tibetan Plateau and circulation over East Asian [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 802–812.
- 张琼, 吴国雄. 2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. *气象学报*, 59 (5): 569–577. Zhang Qiong, Wu Guoxiong. 2001. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia high [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 59 (5): 569–577.
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. *大气科学*, 25 (3): 372–390. Zhang Shunli, Tao Shiyang. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 372–390.
- 赵平, 陈隆勋. 2001. 35 年来青藏高原大气热源气候变化特征及其与中国降水的关系 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 31 (4): 327–332. Zhao Ping, Chen Longxun. 2001. Climate variation characteristics of atmospheric heat source over Tibetan Plateau and its relationship to rainfall over China in recent 35 years [J]. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 31 (4): 327–332.
- Zhao P, Chen L X. 2001. Interannual variability of atmospheric heat source/sink over the Qinghai–Xizang (Tibetan) Plateau and its relation to circulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (1): 106–116.
- Zhao P, Zhang X, Zhou X J, et al. 2004. The sea–ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall [J]. *J. Climate*, 17: 3434–3447.
- 赵平, 周自江. 2005. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系 [J]. *气象学报*, 63 (6): 933–941. Zhao Ping, Zhou Zijiang. 2005. East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 63 (6): 933–941.
- Zhou Dingwen, Fan Guangzhou, Huang Ronghui, et al. 2007. Interannual variability of the normalized difference vegetation index on the Tibetan Plateau and its relationship with climate change [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (3): 474–484.
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 我国华北地区春季降水的年代际变化特征及其可能成因的探讨 [J]. *气候与环境研究*, 11 (4): 441–450. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of interdecadal variability of spring precipitation in North China and its possible cause [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (4): 441–450.
- 周锁铨, 陈万隆. 1995. 青藏高原植被下垫面对东亚大气环流影响的数值试验 [J]. *南京气象学院学报*, 18 (4): 536–542. Zhou Suoquan, Chen Wanlong. 1995. Numerical experiments with effect of Tibetan Plateau vegetation on East Asian atmospheric circulations [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 18 (4): 536–542.
- 周锁铨, 陈万隆, 徐海明, 等. 1998. 青藏高原及其周围植被对夏季气候影响的套网格数值试验比较 [J]. *南京气象学院学报*, 21 (1): 85–93. Zhou Suoquan, Chen Wanlong, Xu Haiming, et al. 1998. Simulation of summer climate effect of vegetation of Tibetan Plateau and its vicinity [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 21 (1): 85–93.